実験トランジスタ・アンプ設計講座

黒田 徹

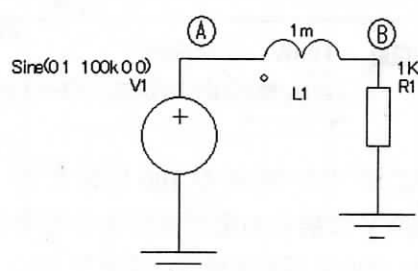
●実用技術編

第10章 回路シミュレータSPICE入門 (20)

リサージュ図形とは

互いに直角方向に振動する2つの単振動を合成して得られる平面図形を，リサージュ図形といいます，フランスのJ. A. Lissajousが1885年に考案しました．

リサージュ図形の定義はわかりにくいので，具体的に説明します．まず“単振動”ですが，これは正弦波（サイン波やコサイン波）です．「互いに直角方向に振動する2つの単振動を合成して得られる平面図形」とは，XY直交平面において，

$$x=A\sin(2\pi f_1 t+\phi_1) \quad \cdots\cdots(10\text{-}61a)$$

$$y=B\sin(2\pi f_2 t+\phi_2) \quad \cdots\cdots(10\text{-}61b)$$

という(x, y)座標の曲線を意味します．周波数f_1とf_2の比が整数の場合は，比較的単純な図形になります．

［例1］ 周波数$f_1=f_2$，かつ位相$\phi_1=\phi_2$の場合，

$$x=A\sin(2\pi f_1 t+\phi_1) \quad \cdots\cdots(10\text{-}62a)$$

$$y=B\sin(2\pi f_1 t+\phi_1) \quad \cdots\cdots(10\text{-}62b)$$

となるので，

$$y/x=B/A$$

が成り立ちます．すなわちリサージュ図形は，

$$y=(B/A)x \cdots(10\text{-}63)$$

という直線です．

［例2］ 周波数$f_1=f_2$，かつ位相ϕ_2がϕ_1より90°進んでいる場合，

$$x=A\sin(2\pi f_1 t+\phi_1) \quad \cdots\cdots(10\text{-}64a)$$

$$y=B\cos(2\pi f_1 t+\phi_1) \quad \cdots\cdots(10\text{-}64b)$$

となります．任意の位相θに対し，

$$\sin^2\theta+\cos^2\theta=1 \quad \cdots(10\text{-}65)$$

なので，(10-64)式から

$$(x/A)^2+(y/B)^2=1 \quad \cdots\cdots(10\text{-}66)$$

が導かれます．つまり，リサージュ図形は楕円です．

〈第1図〉ローパス・フィルタ．入力は100 kHzサイン波

LPFのリサージュ図形

第1図のLPFの入力電圧をX座標，出力電圧をY座標にとってリサージュ図形を描いてみましょう．SIMetrixで第1図の回路を作成します．

L 1=1 mH，R 1=1 kΩ

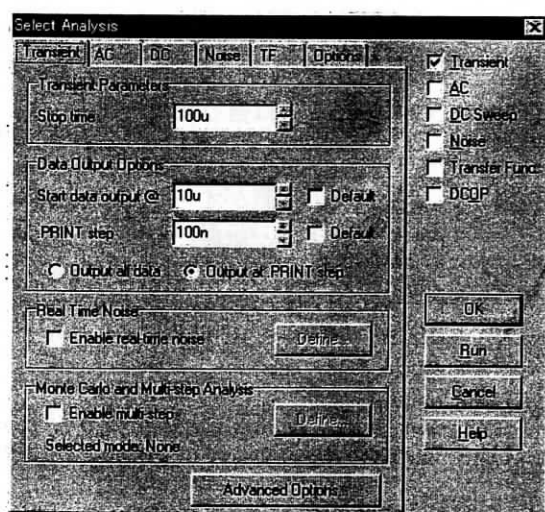
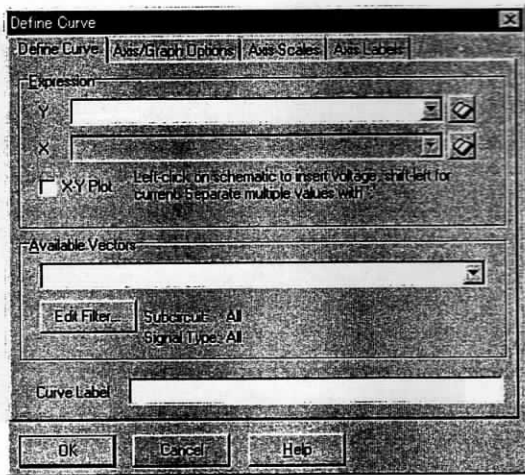
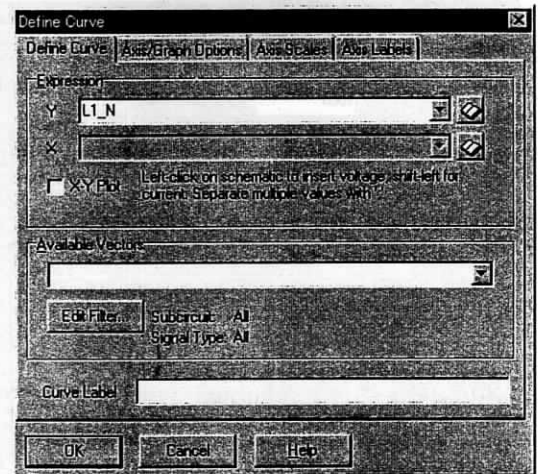
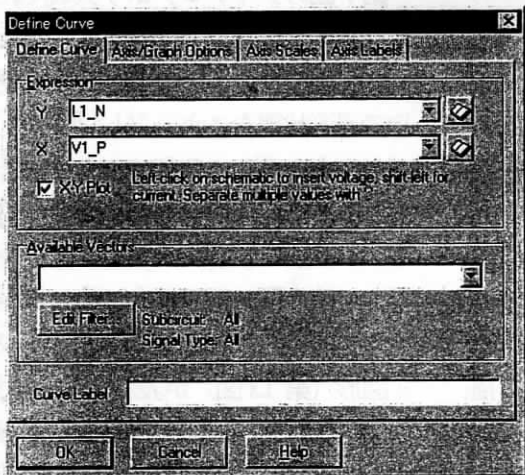
とします．V 1は片ピーク振幅=1 V，f=100 kHzのサイン波です．

(1) 過渡解析の設定と実行

リサージュ図形を描くには，まず過渡解析を実行する必要があります．メニューから［Simulator］→［Choose Analysis...］をクリックし，現れたダイアログボックスを第2図のように編集します．すなわち，

Stop time：100 us
Start data output@：10 us
.PRINT step：100 ns

とします．

Output all data/Output at .PRINT stepの選択は，かならず後者を指定します．解析の種類はTransientをチェックします．

〈第2図〉過渡解析の設定

◀〈第3図〉 Define Curve ダイアログボックス

〈第4図〉▶ 第1図B点の真下の配線をクリックするとYにL1_Nが入力される

◀〈第5図〉 Define Curve ダイアログボックスの最終画面

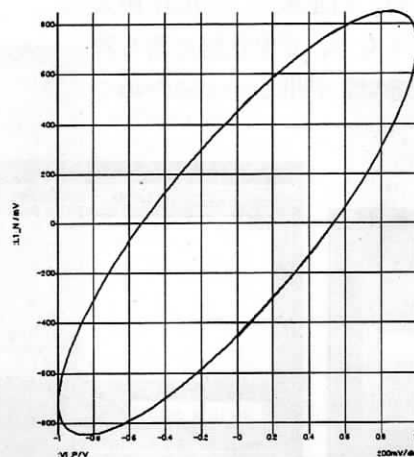
設定がすんだら，ダイアログボックスの Run ボタンを押してください.

(2) **リサージュ図形を描く**

Run ボタンを押してもグラフは表示されません. リサージュを描くには，つぎの操作をします.

[手順 1] メニューから [Probe] → [Add Curve...] をクリックします. Define Curve ダイアログボックス (**第3図**) が現れます. もし，ダイアログボックスが回路図と重なっているときは，ダイアログボックスを回路図と重ならない位置まで移動してください.

[手順 2] ダイアログボックスの設定：最初に Expression (式) の Y (すなわち Y 座標の変数) を設定します. ここには，**第1図**のL1とR1の接続点のノード名を入力します. ノード名を入力するには以下の操作を行います.

描画ウィンドウの十字カーソルをL1とR1の接続点(第1図のB点の真下の配線)に当て，クリックします. すると**第3図**のY入力ボックスに，L1_N という文字が自動的に入ります. L1_N はインダクタL1の一側端子のノード名です. このノードはR1の+側端子R1_Pに接続されているので，YとしてR1_Pが自動的に入力される場合もありますが，別に問題ありません.

〈第6図〉 第1図のLPFのリサージュ図形. Y：入力，X：出力，f=100 kHz

つぎに**第4図**のダイアログボックスの X-Y Plot のチェックボックスをクリックしてから，描画ウィンドウの十字カーソルを**第1図**のA点の真下の配線に当て，クリックします. すると，**第5図**のようにX座標の変数が設定されます. これで，ノードV1_Pの電圧 (すなわち入力電圧) とノードL1_Nの電圧 (すなわち出力電圧) のリサージュ図形を描く設定になりました.

[手順 3] グラフ描画：**第5図**のダイアログボックスの [OK] ボタンを押してください. ただちに**第6図**のリサージュ図形が表示されます.

LPF のカットオフ周波数を変化させる

第1図の LPF のカットオフ周波数 f_c は，

$f_c = 1/2\pi T$ …………(10-67)

ただし，$T = L_1/R_1$

……………………(10-68)

R_1 の値を 100 Ω, 1 kΩ, 10 kΩ に切り換えると，カットオフ周波数は，それぞれ 15.915 kHz，159.15 kHz，1.5915 MHz になります. 各リサージュ図形を描きましょう.

[手順 1] Multi-Step の設定：**第1図**の回路図のメニューから [Simulator] → [Choose Analy-

周波数比２のリサージュ図形

1 kHz サイン波と 2 kHz サイン波のリサージュ図形を描いてみましょう．SIMetrix で**第 14 図**の回路を作成します．

V 1：f=1 kHz, 振幅=1 V, 位相=0

V 2：f=2 kHz, 振幅=1 V, 位相=0

とします．

メニューから［Simulator］→［Choose Analysis...］をクリックし，現れたダイアログボックスを**第 15 図**のように設定し，［Run］ボタンをクリックします．つぎにメニューから［Probe］→［Add Curve...］をクリックし，現れたダイアログボックスを**第 16 図**のように編集します．すなわち，

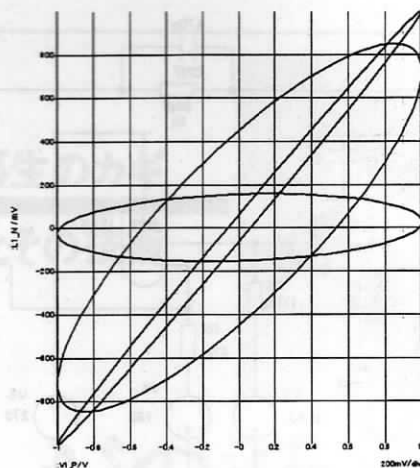
Expression

Y：V 2_P

X：V 1_P

☑ X・Y Plot

とします．Y と X の入力はダイレクトに文字を書き込むか，または，上記のように回路図で V 2 の＋側端子や V 1 の＋側端子に十字カーソルを当てクリックすれば，自動的に入力されます．

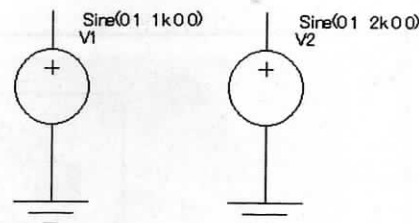
そして**第 16 図**のダイアログボックスの［OK］ボタンをクリックすると，すぐに**第 17 図**のリサージュ図形が表示されます．

(1) 1 kHz サイン波の位相を 45° に設定したときの図形

第 14 図の V 1 のシンボルをクリックして選択し，つぎに F 7 キーを押してください．現れたダイアログボックスの Phase を 45 とします．［OK］ボタンをクリックして回路図に戻り，F 9 キーを押して Run します．そしてメニューから［Probe］→［Add Curve...］をクリックし現れたダイアログボックスを**第 16 図**のように設定して［OK］ボタンをクリックすると，**第 18 図**のリサージュ図形が表示されます．この曲線は，放物線 $y=2x^2-1$ です．リサージュ図形が放物線になることは，

$$x=\sin(\omega t+\pi/4)$$

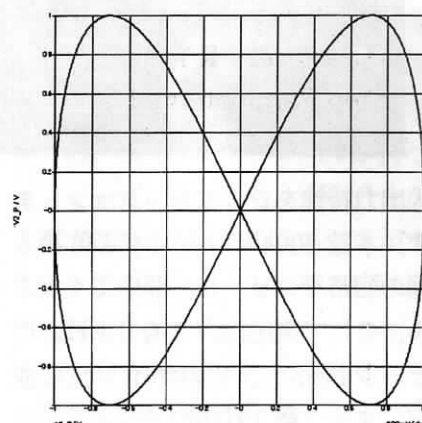
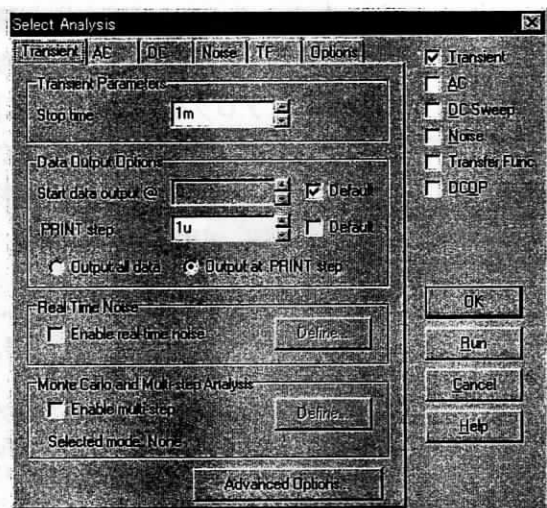
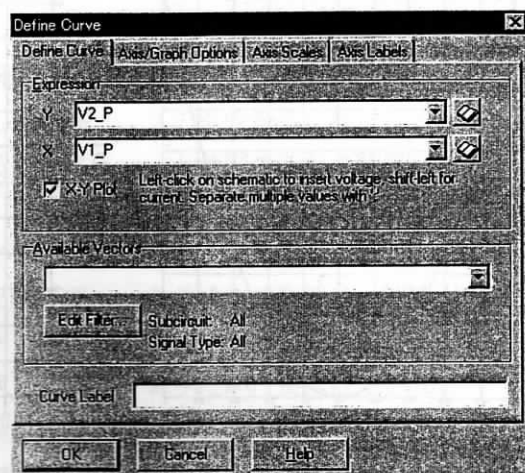
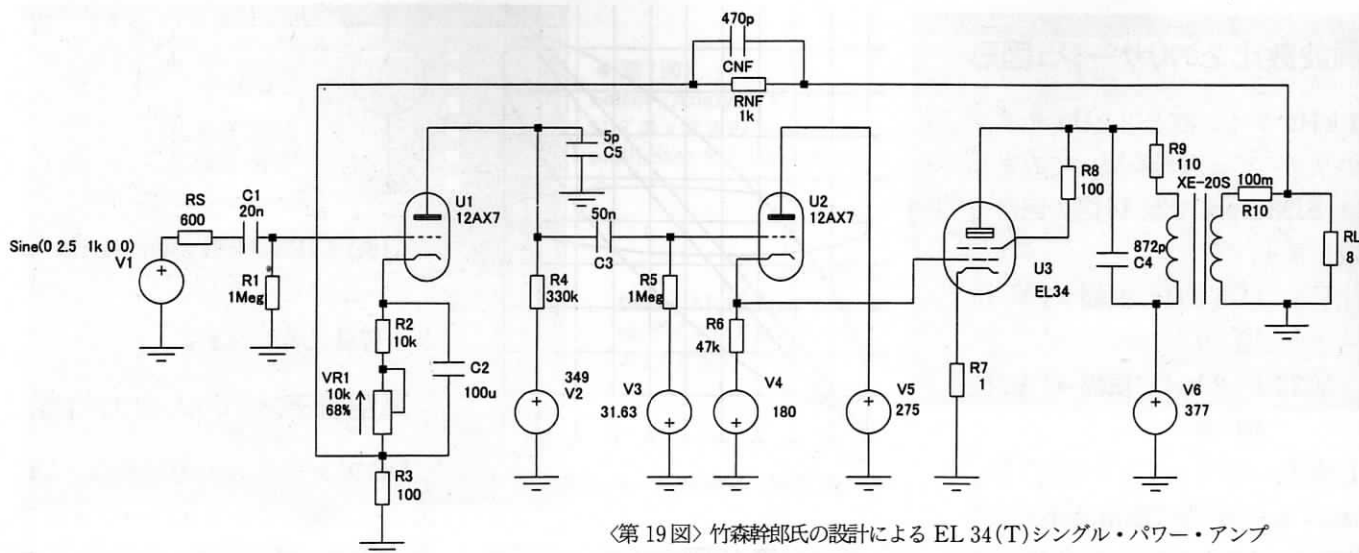
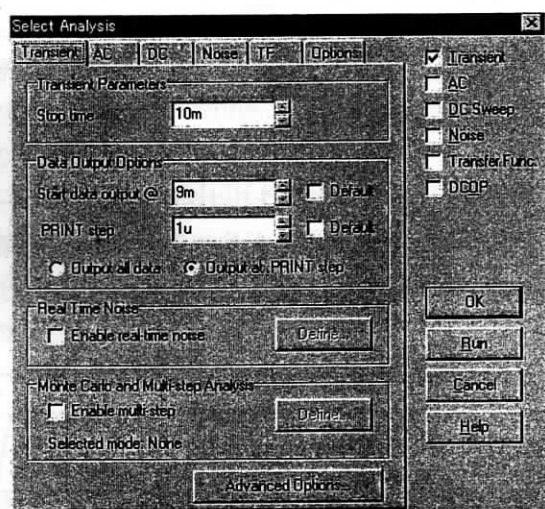
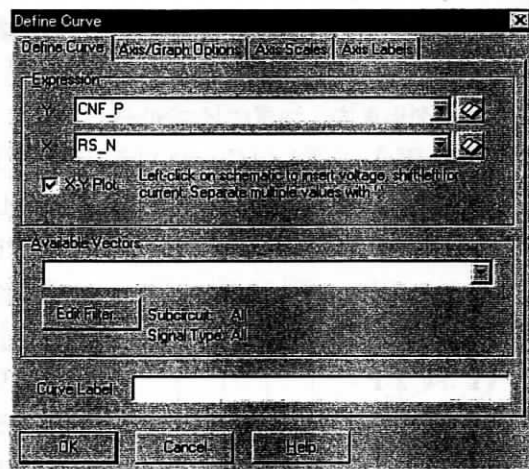
$$y=\sin(2\omega t)$$

から容易に導かれます．

〈第 13 図〉本来のリサージュ図形

〈第 14 図〉1 kHz，2 kHz の電圧源を配置する

真空管アンプの入出力特性

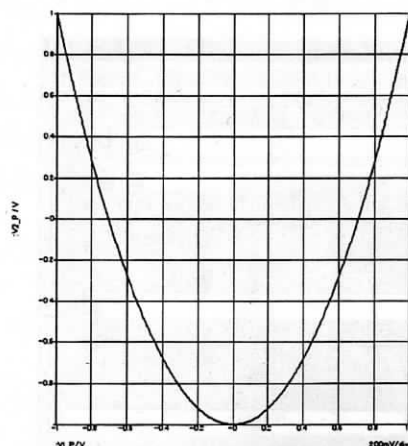
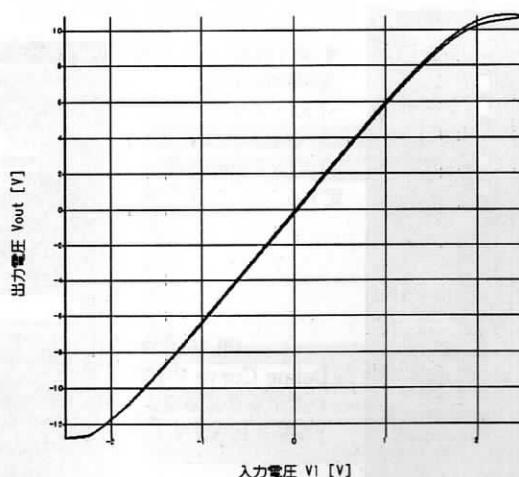
DC アンプの入出力特性は，DC スイープ解析でシミュレーションできますが，真空管アンプのように DC 成分が伝達されない増幅器は DC スイープ解析を適用できません．

しかし，リサージュ図形を描くことにより，入出力特性をシミュレーションできます．一例として，竹森幹郎氏の設計・製作された「EL 34 三結シングル・パワーアンプ」[1]の

〈第 17 図〉第 14 図回路のリサージュ図形．X：V 1，Y：V 2

◀〈第 15 図〉過渡解析の設定．・PRINT Step は 1 us，Output at ・PRINT step を指定する

〈第 16 図〉▶ Define Curve ダイアログボックスの設定．Y：V 2_P，X：V 1_P

〈第19図〉竹森幹郎氏の設計による EL 34(T)シングル・パワー・アンプ

◀〈第20図〉過渡解析の設定．設定値は白枠内と⦿の項で示されている

〈第21図〉▶ Define Curveダイアログボックスの設定．Y：出力，X：入力

入出力特性をシミュレーションします．本誌2004年3月号p.146第8図の回路をコピーし，開いてください．そして電圧線V1を1kHz/片ピーク振幅2.5Vのサイン波に設定します（**第19図**）．

メニューから［Simulator］→［Choose Analysis...］をクリックし，開いたダイアログボックスを**第20図**のように編集し，ダイアログボックスの［Run］ボタンをクリックします．

つぎにメニューから［Probe］→［Add Curve］をクリックし，開いたダイアログボックスを**第21図**のように編集します．ExpressionのYは，**第19図**の回路図で十字カーソルを出力端子(RLの＋側端子)に当てクリックすれば，自動的に入力されます．

つぎにX-Y Plotをチェックしてから，十字カーソルをV1の＋側端子に当て，クリックします．**第21図**のように編集できたならば，ダイアログボックスの[OK]ボタンをクリックします．すぐに入出力特性のリサージュ図形（**第22図**）が表示されます．

〈第18図〉位相45°の1kHzと2kHzのリサージュ

〈第22図〉第18図アンプの入出力特性．f=1kHz

◆引用文献

(1) 竹森幹郎；EL 34(3結)シングル・パワーアンプの製作，2003年1月号，pp.77-84.

(2) 拙稿；実験トランジスタ・アンプ設計講座，本誌2004年3月号p.146，第8図.